基于神经网络的半接双星测光解轨方法*

熊建萍[1,2]，刘超[1,2*]，李蛟[1,2]，李春乾[1,2]，赵永恒[1,2]
（1. 中国科学院国家天文台 北京 100101；2. 中国科学院大学 北京 100049）

摘 要：半接双星对于研究相互作用双星的形成和演化有着重要意义。随着大规模时域巡天时代的到来，预计将发现大量此类天体。针对海量的时域观测数据，需要一种快捷的建模工具对半接双星开展自动化光变曲线分析。基于神经网络构建了半接双星快速测光解轨模型。该模型根据光变曲线和已知的主星温度对半接双星的轨道进行建模，获得其轨道倾角、相对半径、质量比和温度比等4个基本参数。结果表明，半接双星神经网络解轨模型能够快速地对一条光变曲线建模。在测光误差小于光变曲线振幅1%时，模型对于轨道倾角接近90°、温度比约为0.6、光变振幅为1.84mag的半接双星的轨道倾角、相对半径、质量比和温度比的测量误差分别为1.251、0.004、0.008和0.003。另外，模型应用在Kepler实测光变曲线的结果表明，模型能够较为准确地对脉动食双星的光变曲线进行建模（拟合度可达0.9以上）。此外，该模型作为一个通用工具可以迁移到不同测光巡天项目上。

关键词：恒星物理；掩食双星；密近双星；机器学习；数据分析；
中图分类号：P144　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1672-7673（2023）

双星系统为研究恒星结构与演化提供了一个重要信息来源，双星中的半接双星(semi-detached binary)，是指双星中的一颗子星充满洛希瓣，另外的一颗子星未充满洛希瓣，并且充满洛希瓣的子星通过内拉格朗日点向另外一颗子星传递物质的双星系统。在双星系统中，子星充满洛希瓣发生物质转移，会引起双星系统的动能、势能、热能的变化，这将直接影响双星的结构和演化，同时这会使得恒星演化进程和结局发生戏剧性的改变[1]。有关相互作用双星的演化仍然是目前双星演化理论中的难点[2]。半接双星子星间的相互作用和两子星间的物质交流和能量转移等过程，使得半接双星的演化进程和结局变得难以确定，因此，相互作用的双星的形成、演化和结局仍是双星演化的未解问题[3]。半接双星的参数（如质量比、轨道倾角和温度比等）为研究密近双星系统的质量和角动量转移、损失和重新分布等提供了有利的数据基础。除此之外，光变曲线的建模也是研究食双星中恒星脉动机制的基础，通过光变曲线建模消除双星掩食造成的光度变化后，我们能够发现双星中的非径向振荡，进而通过星震分析来约束超射参数，为了解恒星内部结构提供重要依据[4-5]。

近年来，随着NASA/Kepler[6]和TESS[7]空间观测站的发射，以及ZTF[8]和ASAS-SN[9]等望远镜的成功运行，我们进入了一个精确空间大规模时域测光的新时代，越来越多的双星也随之

*基金项目：国家自然科学基金(11835057)资助.
收稿日期：2022-09-22；修订日期：2022-10-10
作者简介：熊建萍，女，博士研究生，主要研究天文数据处理分析.Email：xiongjianping@nao.cas.cn
通信作者：刘　超，男，研究员，主要研究银河系结构和动力学、恒星物理、天文数据处理分析等. Email：liuchao@nao.cas.cn

被证认，Kepler/K2 测光巡天证认了约 2900 颗食双星[10],文[11]从 ZTF DR2 数据集中证认并提供了约 350,000 颗食双星的光变曲线。ASAS-SN 测光巡天发布了约 426,000 颗变星的光变曲线[12]；Catalina 项目提供了约 47,000 条周期变星的光变曲线[13]。这为双星的发现和研究提供了巨大的机遇。目前，对于双星的光变曲线建模大多基于 PHOEBE 模型[14]或是 Wilson-Devinney(WD) code[15]，采用 WD 或者 PHOEBE 程序对一个目标的光变曲线建模需要的计算时间长达数小时甚至数天。海量的光变曲线需要一种更加快速的光变曲线建模方法，这对开展双星的性质统计分析以及快速搜寻双星中具有特殊机制的样本有重要意义。

本文提出采用神经网络对半接双星的光变曲线进行轨道参数求解，达到光变曲线的快速建模的目的。

1 测光解轨的神经网络建模

一般来说，双星的光变曲线中食的形状可以反映轨道倾角，掩食的持续时间和它们的相对位置反映了轨道的偏心率、近星点经度和两个子星的半径之和，除此之外，两次掩食的深度比表明了两颗子星表面温度和遮挡面积之间的关系，另外，重力昏暗、临边变暗、反射系数、黑子以及恒星周围的物质也会在光变曲线上有一定的显示。由此，通过解轨，我们可以从光变曲线中得到双星系统的周期、轨道倾角、光度比、相对半径（r=R/a，其中 R 为子星的等效半径，a 为双星轨道半长轴）等特征。近相接双星光变曲线一些特征的统计显示，轨道倾角大于 70°的近相接双星才容易观测，并且大部分近相接双星是由光谱型为 A，F 型的主星和晚一到两个光谱型的次星组成[16]。

1.1 模型样本数据

半接双星根据子星是否充满洛希瓣，半接双星充满络希瓣的类型可以分为两种[16]：（1）主星（质量大的子星）充满洛希瓣，次星未充满或临近充满洛希瓣；(2)次星（质量小的子星）充满洛希瓣，主星未充满或临近充满洛希瓣。

由于我们无法直接从光变曲线判定半接双星是主星充满还是次星充满的状态，并且两种状态下的光变曲线在某些参数空间存在简并。如果将主星充满和次星充满的光变曲线进行统一训练，由于参数简并导致模型精度降低，造成模型预测的参数不准确，且无法判定半接双星的状态。因此，本文分别构建主星充满和次星充满两个状态的光变曲线测光解轨模型。针对一条实测光变曲线，模型可以给出在主星充满和次星充满两个状态下的最佳参数解，并由PHOEBE根据两组参数重现的光变曲线联合实测光变曲线计算拟合度，最后根据拟合度判断半接双星所处的状态以及参数。

我们将主星温度 T_1 的范围设定为 5000 - 10000K；并将“主星”定义为双星中质量较大的子星，并且“主星”也定义为“星 1”。轨道倾角(incl)的范围为 60 - 90°，质量比($q=\frac{M_2}{M_1}$)的范围为 0.1 - 1，次星温度(T_2)的范围假设为 3800 - 10000K，子星洛希瓣的临界半径R_{L1}和R_{L2}[17]为

$$\frac{R_{L1}}{a} \cong \frac{0.49q^{-\frac{2}{3}}}{0.6q^{-\frac{2}{3}}+ln(1+q^{-\frac{1}{3}})}, \tag{1}$$

$$R_{L2} \approx \frac{R_{L1}}{q^{-0.46}} , \tag{2}$$

并且在该范围内随机生成相对半径(R/a)。

基于上述的参数范围，针对主星充满测光解轨模型，我们将轨道倾角、质量比、主次星温度、次星相对半径作为自由参数，在规定的各个参数范围内每次均匀、随机地抽取一组参数，利用 PHOEBE 在 0-1 的相位内，生成 100 个采样点的光变曲线，并将光变曲线的流量值转换成 Kepler 星等，从而获得构建主星充满测光解轨模型的数据集。PHOEBE 用“流量(flux)”表示双星的光变曲线的振幅，因此需要根据

$$mag_i = -2.5log10(flux_i) \quad , \tag{3}$$

$$mag_i^{'} = mag_i - \frac{\sum_i^n mag_i}{n} \tag{4}$$

对 PHOEBE 产生的光变曲线进行标准化。其中，$flux_i$为利用 PHOEBE 生成 100 个采样点的光变曲线的流量值；$mag_i^{'}$ 为标准化后的光变曲线对应的星等。同样，针对次星充满模型采取同样的方法构建模型的数据集。

针对主星充满测光解轨模型和次星充满测光解轨模型，本文分别产生了约 30 万条光变曲线用于构建模型。图 1(a) 和(b)分别为数据集在各个参数的频率统计直方图，从图 1 可以看出，数据集在相对半径、温度比上的分布较不均匀，这是由于参数之间的相互约束导致的。因此，为了解决样本在各个参数空间分布不均匀的问题，对于模型训练中每次迭代过程随机抽取训练集中的 5 万条数据进行训练，直至模型收敛。同时，数据集中的主星温度、轨道倾角、质量比、主次星温度比、次星相对半径的尺度也通过 sklearn 提供的 StandardScaler 标准化方法进行了标准化。最终，将数据集按照训练集：验证集：测试集=7：2：1 进行划分用于模型的训练和检验。

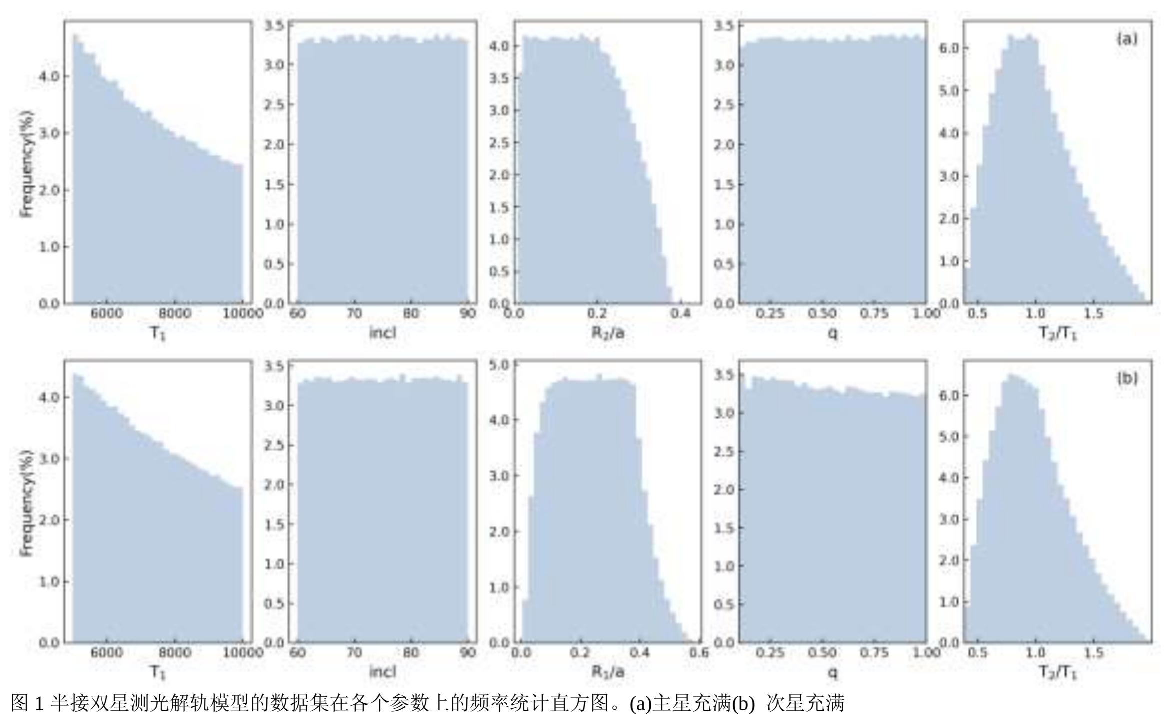


图 1 半接双星测光解轨模型的数据集在各个参数上的频率统计直方图。(a)主星充满(b) 次星充满

Fig. 1 The frequency distribution of the five parameters (T1, incl, q, R/a, T2/T1) for light curve modeling of semi-detached binaries. (a) The primary filling model；(b) the secondary fill model.

1.2 测光解轨的神经网络建模

图2显示了本文采用的网络结构。本文基于多层感知器（Multi-Layer Perception，MLP）结构设计模型，多层感知器包括输入层、隐藏层和输出层。本文的网络结构包含1个输入层，8个隐藏层和1个输出层。输入层包含101个神经元，即100个数据点构成的光变曲线和主星温度(T_1)。每个隐藏层是一个全联接层(FC，full connection)，每层输入和输出的神经元个数如图2中的数字所示。为了减小传播过程中的特征损失，在隐藏层，本文通过引入残差块增强特征。残差块的隐藏层之间采用tanh激活函数进行连接，有效增强了网络非线性表达能力。本文采用反向传播算法对多层感知模型进行训练，采用Adam优化器和损失函数L2，即

$$D_{L2}=\sum_{i=1}^{n}(y_i-f(x_i))^2 \qquad (5)$$

其中，y_i为真实值；$f(x_i)$为预测值。最后，模型输出轨道倾角(incl)、相对半径(R/a)、质量比(q)和温度比(T_2/T_1) 4个参数。

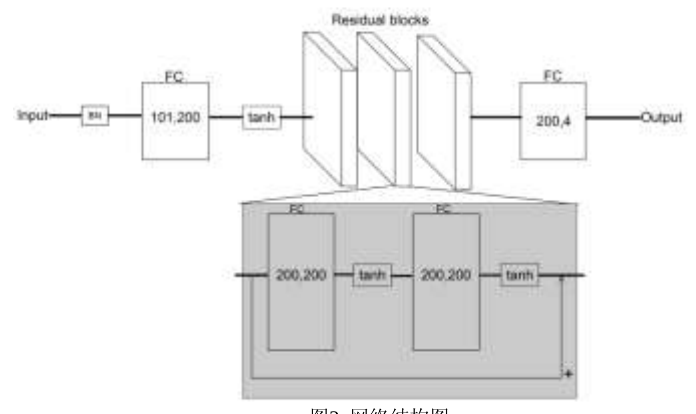
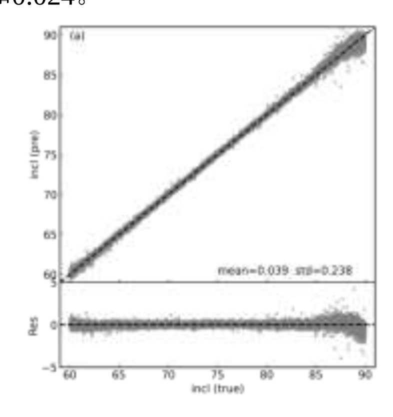


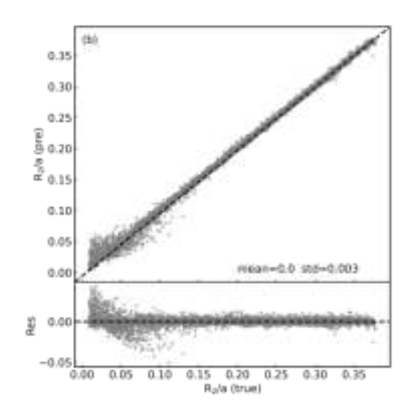
图2 网络结构图

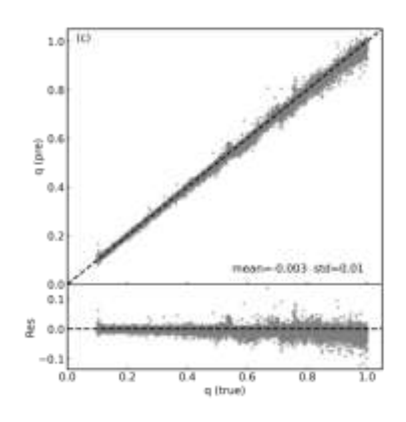
Fig.2 Construction of the neural network for light curve modeling

1.2.1 构建主星充满测光解轨模型

在构建主星充满测光解轨模型时，我们将训练集中100个采样点构成的光变曲线和主星温度(T_1)作为输入数据，将轨道倾角(incl)、次星相对半径(R_2/a)、质量比(q)、温度比(T_2/T_1)作为输出，对光变和参数之间的映射关系进行了训练。结果如图3，图3(a)-(d)依次显示了测试集的轨道倾角、次星相对半径、质量比、温度比和模型预测得到的结果对比。从图3可以看出模型预测的轨道倾角、次星相对半径、质量比、温度比和测试集的真实值的偏差分别为0.039，0.000，-0.003和-0.002，并且轨道倾角、相对半径、质量比和温度比与测试集的真实值的残差的标准差分别为0.238，0.003，0.010和0.024。







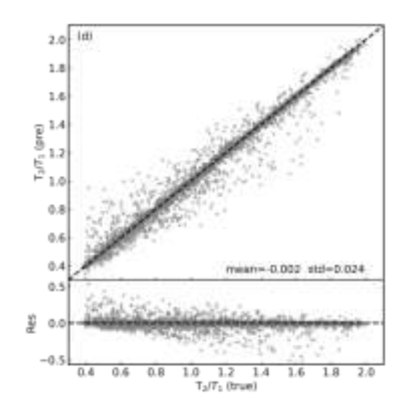


图3 主星充满的测光解轨模型进行检验的结果。(a):测试集的轨道倾角(incl)和模型预测得到轨道倾角的结果对比；(b):测试集的次星相对半径(R_2/a)和模型预测得到相对半径的结果对比；(c)测试集的质量比(q)和模型预测得到质量比的结果对比；(d)测试集的温度比(T_2/T_1)和模型预测得到的温度比结果对比。

Fig. 3 The result of the primary filling model. (a)-(d) show the residual between model prediction and the true value of the test set in orbital inclination(incl), relative radius(R/a), mass ratio(q), and temperature ratio(T2/T1).

图4显示了假设主星充满并根据主星温度T_1=6000K，轨道倾角*incl*=85°，次星相对半径R_2/a=0.3，质量比q=0.5，温度比T_2/T_1=0.866为参数模拟的一条半接双星光变曲线利用主星充满测光解轨模型进行光变曲线建模的结果。模型根据输入的光变曲线和主星温度，预测得到的轨道倾角为84.95°，相对半径为0.299，质量比为0.499，温度比为0.867。接着，我们根据模型预测得到的参数利用PHOEBE对光变曲线进行了重现，结果如图4上方图像中的红色实线，图4的下方图像显示了原始光变曲线（蓝色数据点）和采用模型预测得到的参数重现的光变曲线之间的残差。从图中可以看出，两条光变曲线能够较好地匹配，而在掩食对应位置光变曲线的残差大于其他位置的残差，主要是模型在预测时输入的100个数据点的光变曲线是均匀采样，使得掩食部分的数据点较少造成的。此外，模型预测得到的参数重现的光变曲线和原始观测数据之间的残差小于0.005mag，并且拟合度(R^2)为0.994。其中拟合度定义为

$$R^2=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(f(x_i)-\bar{y})^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2} \quad \text{（}f(x_i)\text{为预测值，y为真实值）} \quad . \qquad (6)$$

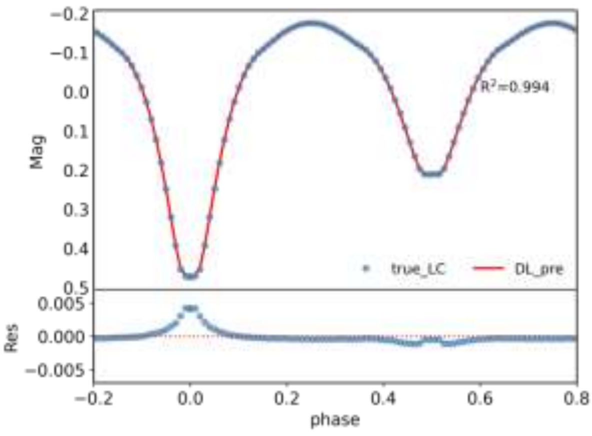
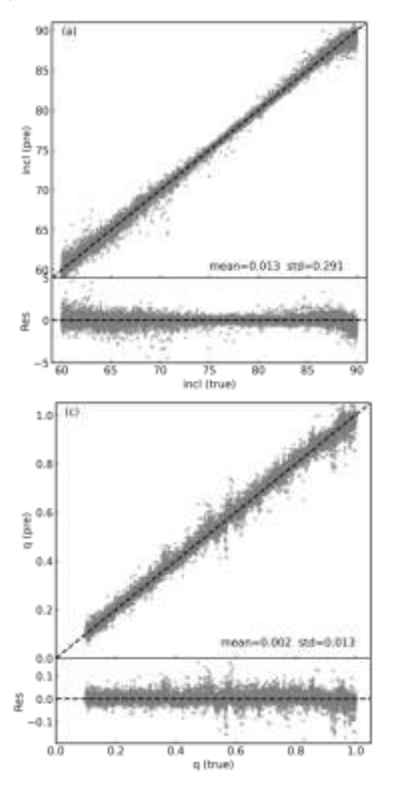


图4 采用主星充满测光解轨模型进行光变曲线建模的结果，其主要参数为主星温度T_1=6000K，轨道倾角*incl*=85°，相对半径R_2/a=0.3，质量比q=0.5，温度比T_2/T_1=0.866

Fig. 4 The validation of the light curve for the primary filling model, the blue dots are the true light curve, and the red line is the model prediction result. The parameters are T_1=6000K, incl=85°, R_2/a=0.3, q=0.5, and T_2/T_1=0.866.

1.2.2 构建次星充满测光解轨模型

同样的，我们将训练集中100个采样点构成的光变曲线和主星温度(T_1)作为输入数据，将轨道倾角、主星相对半径、质量比和温度比作为输出，对次星充满测光解轨模型中的光变曲线和参数之间的映射关系进行了训练。结果如图5，图5(a)-(d)依次显示了测试集中轨道倾角、相对半径、质量比、温度比和模型预测得到的结果对比，从图中可以看出，模型预测的轨道倾角、相对半径、质量比、温度比和测试集的真实值的偏差分别为0.013，0.000，0.002和-0.001，并且轨道倾角、相对半径、质量比和温度比与测试集真实值残差的标准差分别为0.291，0.004，0.013和0.016。



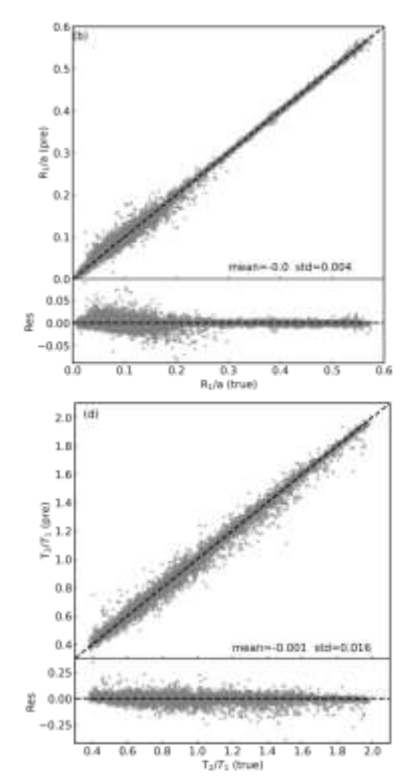


图5 次星充满的测光解轨模型进行检验的结果。(a):测试集的轨道倾角(incl)和模型预测得到轨道倾角的结果对比；(b):测试集的主星相对半径(R_1/a)和模型预测得到相对半径的结果对比；(c)测试集的质量比(q)和模型预测得到质量比的结果对比；(d)测试集的温度比(T_2/T_1)和模型预测得到的温度比结果对比。

Fig. 5 The result of the secondary filling model. (a)-(d) show the residual between model prediction and the true value of the test set in orbital inclination(incl), relative radius(R/a), mass ratio(q), and temperature ratio(T2/T1)

同样，假设次星充满，图6显示了主星温度T_1=7600K，轨道倾角*incl*=85°，主星相对半径R_1/a=0.4，质量比q=0.2，温度比T_2/T_1=0.684的一条光变曲线采用次星充满模型进行建模的结果。模型根据输入的光变曲线和主星温度，获得的参数为轨道倾角为84.88°，相对半径为0.399，质量比为0.200，温度比为0.681。图中蓝色点显示了原始模拟的光变曲线，红色实线是PHOEBE根据模型预测的参数重现的光变曲线，从图6可以看出，两条光变曲线能够较好地匹配，与主星充满测光解轨模型一样，图6中的光变曲线在掩食对应位置的残差也大于其他位置的残差，这主要也是因为掩食部分的数据点较少。另外，从图中可以看出两条光变曲线之间的残差小于0.005mag，并且拟合度(R^2)为0.9957。

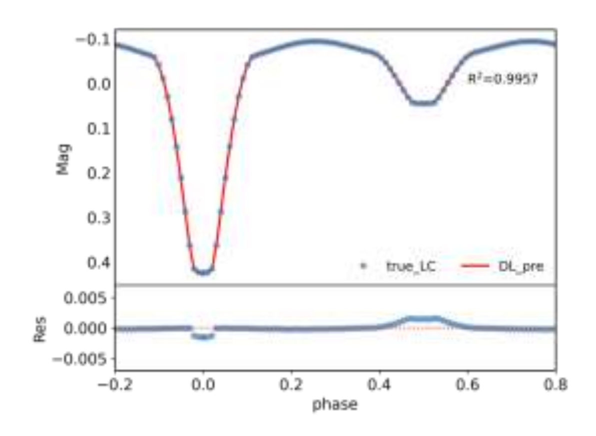


图6 采用次星充满测光解轨模型进行光变曲线建模的结果，其主要参数为T_1=7600K，*incl*=85°，R_1/a=0.4，质量比q=0.2，温度比T_2/T_1=0.684

Fig. 6 The validation of the light curve for the secondary filling model, the blue dots are the true light curve, and the red line is the model prediction result. The parameters are T_1=7600K, incl=85°, R_1/a=0.4, q=0.2, and T_2/T_1=0.684.

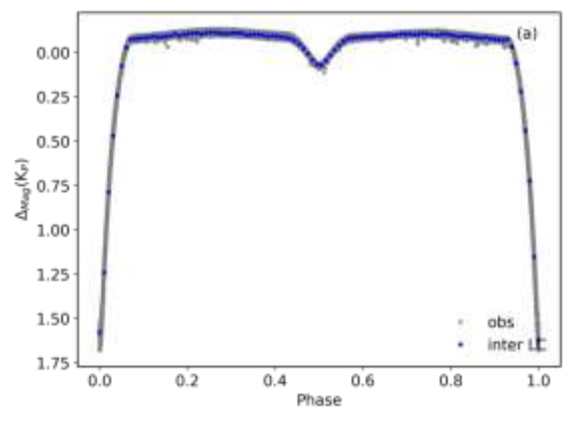
3 实测数据的测光解轨分析

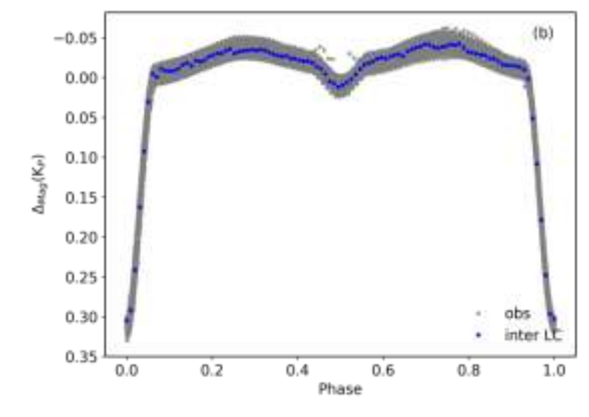
3.1 Kepler 天区半接双星测光解轨结果

NASA的Kepler卫星于2009年3月发射，其主镜口径为1.4m(有效通光口径为0.95m)，视场为105平方度。Kepler卫星提供了长曝光（longcadence，LC；曝光时间29.4min）的观测数据和短曝光（shortcadence，SC；曝光时间58.8s)的观测数据。文[18]对Kepler卫星观测得到的2165颗食双星进行分类，共有1261个分离双星(detached binary)，152个半接双星(semi-detached binary)，469个相接双星(overcontact binary)。我们从其中挑选已经获得轨道参数解的半接双星对模型应用在实际观测的数据上的效果进行了分析。

针对实际的观测数据，解轨步骤如下：

（1）光变曲线预处理；首先，将光变曲线根据Kepler卫星提供的周期折叠到相位上，然后根据(2)式和(3)式对观测数据进行标准化并剔除观测误差大于$3\sigma_{mag}$的数据点；接着，我们将原始数据在相位区间(0,1)上分为100个bin，并将每个bin中数据点的均值作为输入的光变曲线。图7(a)-(e)显示了Kepler卫星观测获得的5颗半接双星（KIC10581918[4]，KIC10619109[4]，KIC06669809[4]，KIC06206751[19]和KIC06048106[20]）的光变曲线经过预处理后的结果，其中灰色点表示原始的观测数据，蓝色数据点是经预处理后输入模型中进行参数预测的光变曲线。





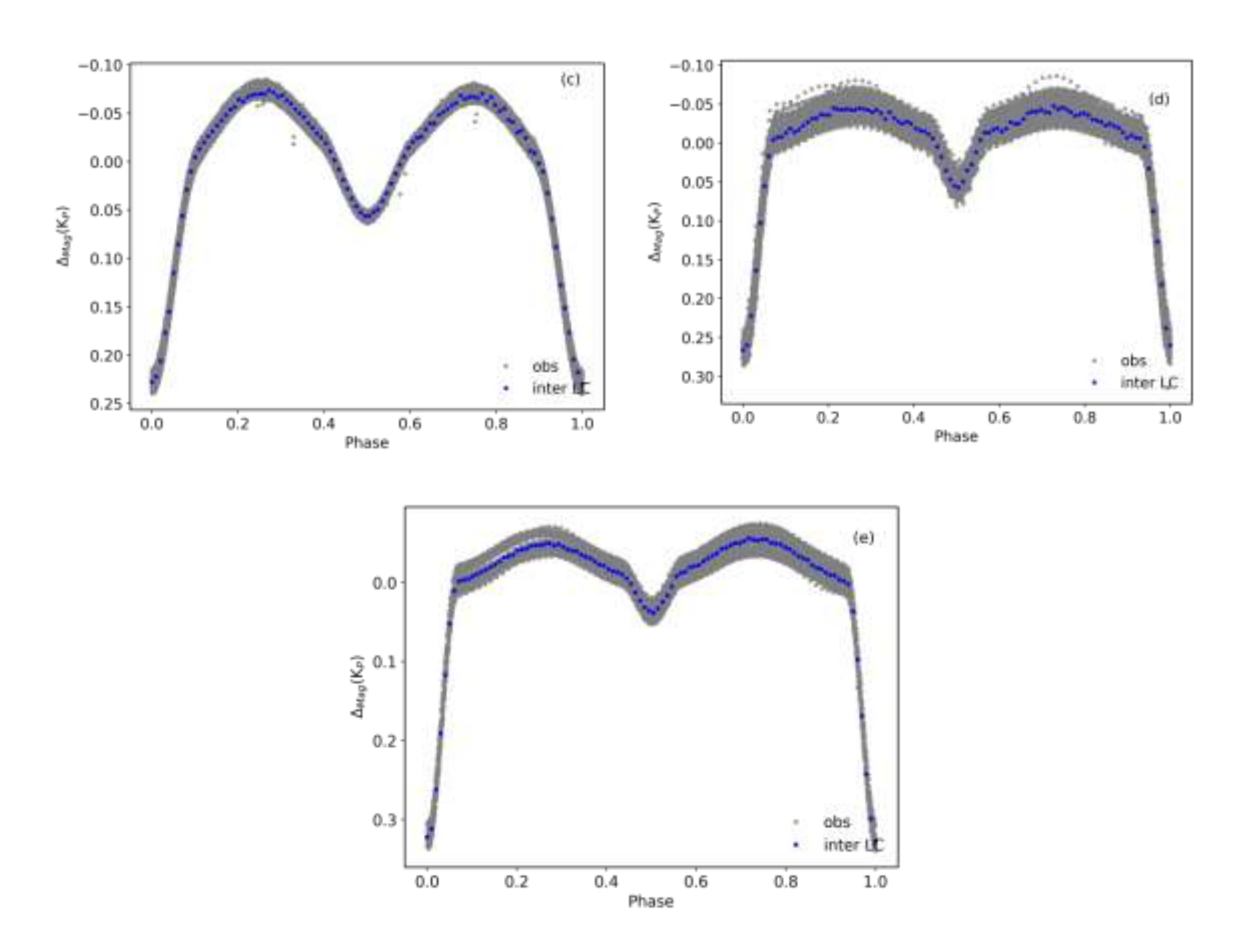


图7 KIC10581918，KIC10619109，KIC06669809，KIC06206751和KIC06048106经过预处理步骤的结果。灰色数据点是观测获得的光变曲线，蓝色数据点是经过预处理后输入到模型中的光变曲线

Fig.7 The results of light curve pre-processing for KIC10581918, KIC10619109, KIC06669809, KIC06206751, and KIC06048106. The Grey points are the light curves from observation, and blue dots are the result of pre-processing.

（2）将第1步获得的光变曲线以及由Kepler卫星提供的（或从光谱测量得到的）主星温度T_1分别输入主星充满和次星充满测光解轨模型中对参数预测，并将预测的参数输入PHOEBE中进行光变曲线重现，计算拟合的光变曲线与观测数据的拟合度R^2，最后将R^2大的光变曲线对应的参数作为测光解轨的参数。

根据上述步骤，我们对5颗半接双星进行参数预测。图8(a)-(e)分别为采用本文的模型对KIC10581918，KIC10619109，KIC06669809，KIC06206751和KIC06048106的光变曲线进行建模的结果，图中灰色数据点为原始光变曲线，橙色虚线为采用主星充满测光模型得到的结果，蓝色线为采用次星测光解轨模型得到的结果。从图中可以看出,5颗半接双星都是采用次星充满模型预测得到的参数拟合的光变曲线与实际观测的光变曲线拟合度高于主星充满的模型预测得到的结果。因此，我们认为KIC10581918，KIC10619109，KIC06669809，KIC06206751和KIC06048106是次星充满的半接双星，这与已有文献得到的结果一致。

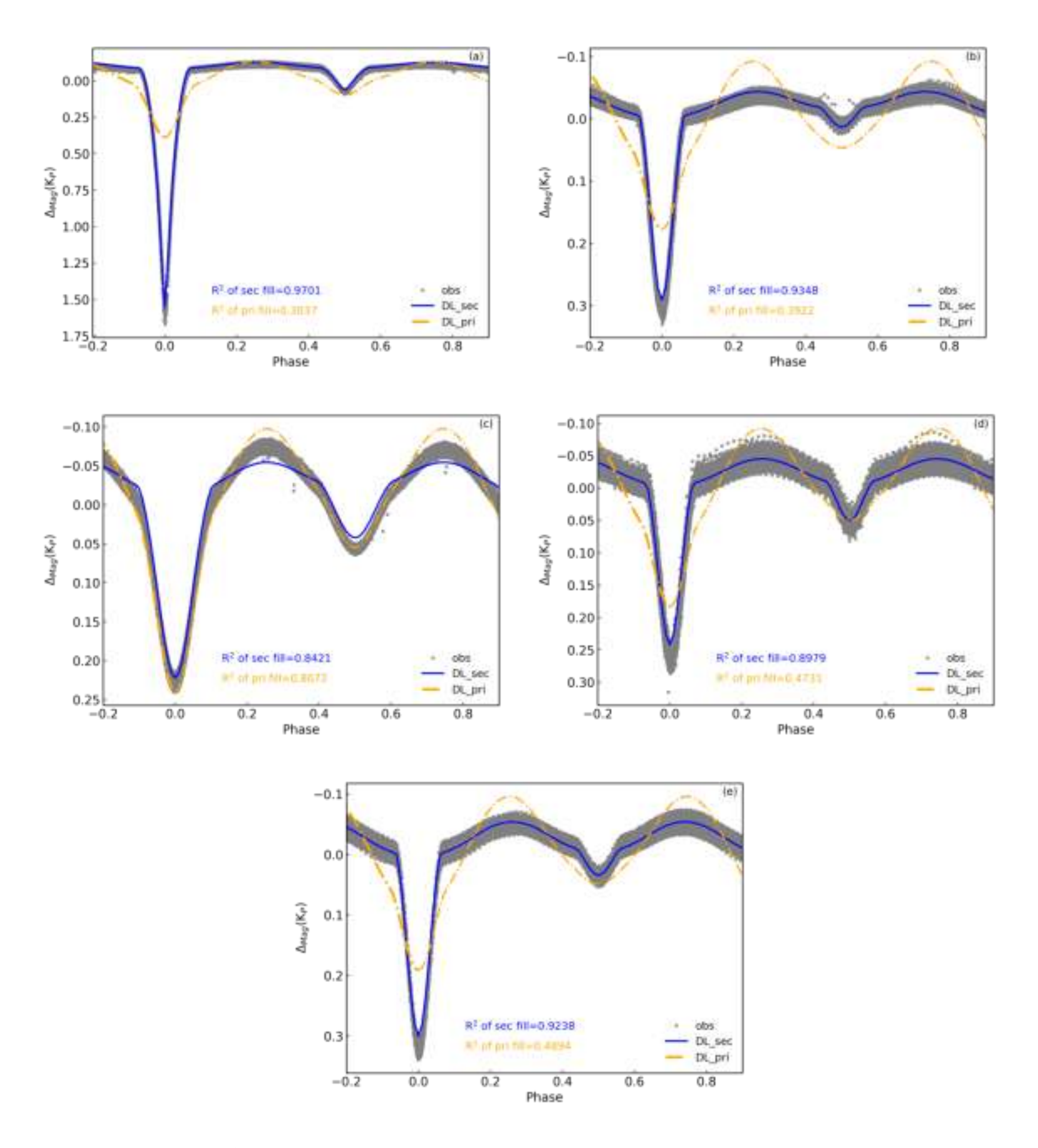


图8 (a)-(e)依次显示模型拟合KIC10581918，KIC10619109，KIC06669809，KIC06206751和KIC06048106的结果，灰色数据点表示Kepler观测获得的光变曲线，橙色虚线显示的是采用主星充满测光模型求解的参数拟合得到的光变曲线，蓝色线显示的是采用次星测光解轨模型求解的参数拟合得到的光变曲线

Fig. 8　The results of model prediction for KIC10581918, KIC10619109, KIC06669809, KIC06206751, and KIC06048106. The Grey points are the light curves from observation, the blue lines are the result of the secondary filling model, and the orange dashed dot lines result from the primary filling model.

表1显示了采用基于神经网络的半接双星测光解轨模型获得的KIC10581918，KIC10619109，KIC06669809，KIC06206751和KIC06048106的参数与已有文献中采用PHOEBE或WD获得的轨道参数的对比。从表1可以看出，采用本文提出的基于神经网络的测光解轨模型对半接双星进行解轨得到的参数大多在文献中获得的轨道参数的误差范围内，对于KIC06669809和KIC06206751

其拟合度低于0.9，可能的原因是(1)KIC06669809和KIC06206751的光变曲线在非掩时刻（相位在0.25和0.75附近）展示不对称的情况，这可能是由于子星上的黑子或热斑造成的光变曲线不对称；(2)对于KIC06669809，除了光变曲线不对称，其轨道倾角也低于70°，因此在一定程度上影响了参数的估计准确度；(3)对于KIC06206751，除了在相位=0.25和0.75附近光变曲线不对称的原因，还有可能是由双星轨道存在一定的偏心率导致的(separation between primary and secondary eclipse (seq)=0.5008)。对于子星上有黑子或热斑的半接双星，在模型构建过程中，由于没有加入此类光变曲线，因此模型对于这类双星的光变曲线建模，拟合度可能低于0.9。而对于没有因子星上的黑子、热斑造成光变曲线的不对称的脉动食双星，该模型能够较为准确地对这类食双星的光变曲线进行建模，这对后续分析恒星脉动机制有重要的意义。另外，该模型能够在对大量光变曲线进行快速建模后，也为我们发现一些具有特殊机制的食双星提供了一个有效的工具。

表1 基于深度学习网络获得的参数与已有文献结果的对比

Table 1 Comparison of the parameters between the deep learning results with the literature.

Star	T_1	incl		R/a		q		T_2/T_1		R^2
		Ref	DL	Ref	DL	Ref	DL	Ref	DL	
KIC10581918[4]	7900	89.0±0.2	87.79	0.213±0.031	0.202	0.12±0.01	0.122	0.627±0.016	0.636	0.9701
KIC10619109[4]	7070	75.0±0.01	71.94	0.240±0.030	0.213	0.14±0.01	0.275	0.558±0.013	0.580	0.9348
KIC06669809[4]	7400	67.5±0.1	71.70	0.399±0.046	0.417	0.310±0.010	0.164	0.661±0.018	0.696	0.8421
KIC06206751[19]	6965	75.09±0.20	74.43	0.235±0.034	0.262	0.1295±0.0031	0.115	0.679±0.035	0.727	0.8979
KIC06048106[20]	6999	73.90±0.03	72.28	0.218±0.068	0.199	0.2097±0.0033	0.304	0.639±0.043	0.650	0.9238

3.2 模型解轨结果分析

对于Kepler巡天，针对Kpmag<13mag的恒星曝光30min，其测光精度约为100ppm (~0.0001mag)[21]。但是对于双星，观测误差(σ_{mag})对食双星的参数测量的影响与光变曲线的振幅(A_{mag})有关。因此，我们定义相对测量误差=σ_{mag}/A_{mag}来表征观测误差对双星的光变曲线的影响。本文以KIC10581918为样本（振幅约为1.84 mag），利用蒙特卡洛模拟对该模型在不同观测误差下参数测量的误差进行估计。首先，我们对KIC10581918的原始观测数据加上不同相对误差对应的噪声，再将原始数据在0-1的相位上分为100个bin，并将每个bin中的数据点的均值作为输入的光变曲线，利用次星充满模型估计不同相对误差下KIC10581918的轨道倾角、主星相对半径、质量比和温度比以及它们的误差。图9中横坐标为不同的相对误差，红色点为模型预测参数与已有文献的参数的差值，灰色阴影部分表示模型预测的参数误差。

从图9可以看出，模型预测参数的误差随着相对误差的增大而增大，并且在相对误差为0.01时，模型对KIC10581918的轨道倾角、相对半径、质量比和温度比的测量误差分别为1.251，0.004，0.008和0.003。与表1的结果相比，在相对误差为0.01时，针对KIC10581918，模型对相对半径、质量比和温度比的测量与已有文献的结果相比，其偏差和误差均在对应的误差范围内。对于倾角的测量，模型获得的轨道倾角与已有文献的轨道倾角的偏差约为-1.2°。另外，随着相对误差增大，模型预测得到的轨道倾角，主星相对半径和温度比也呈现增加的趋势，这是因为对于KIC10581918，其光变曲线的主极小和次级小的食深相差较大，随着噪声增加，噪声对食深较浅的次级小时刻的影响大于主极小，在半接双星模型的假设下，轨道倾角的测量增大、次星的半径变小（图中反映出主星的相对半径增大的趋势），进而使得质量比变小、温度比变大。

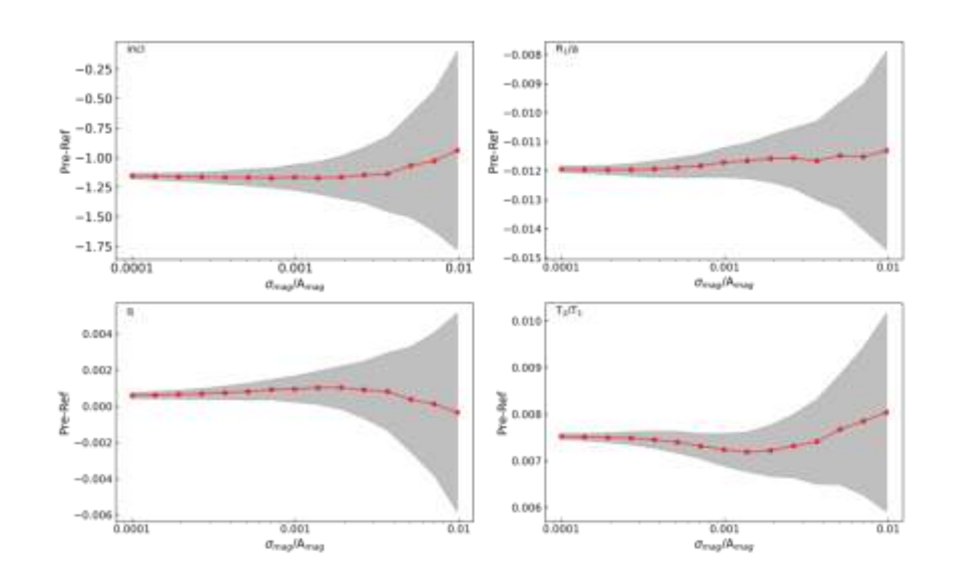


图9 KIC10581918在不同观测误差下，模型的参数测量误差的统计图
Fig.9 The measurement error of orbital inclination(incl), relative radius(R/a), mass ratio(q), and temperature ratio(T2/T1) with different relative errors in observation for KIC10581918.

综上可得，模型用于求解Kepler巡天的半接双星结果表明，该模型能够较为准确地获得双星的参数，并且根据模型获得的参数重现的光变曲线与实测的光变曲线的拟合度达到0.9。另外，在测光误差相对于光变曲线的振幅为0.01时，对于轨道倾角接近90°、温度比约为0.6、光变振幅为1.84mag的半接双星，根据次星充满测光解轨模型获得的轨道倾角、相对半径、质量比和温度比的测量误差分别为1.251，0.004，0.008和0.003，这为批量获得半接双星参数研究密近双星系统的质量和角动量转移、损失和重新分布等提供了有利的数据基础。

该神经网络构建的半接双星测光解轨模型能够快速地对一条光变曲线建模，对100个数据点的光变曲线建模，在128GB的内存下搭载主频为2.10GHz的Intel(R) Xeon(R) Gold 5218R的CPU，采用该模型对光变曲线进行建模，需要的运行时间约为5ms，采用PHOEBE在同样的运行条件下，对100个数据点的拟合所需要的运行时间约为4s。但是，如果采用MCMC+PHOEBE对一条光变曲线进行参数拟合，对于100个数据点，在4个自由参数，MCMC的walker为80，step设置为2000时，则需要的运行时间约10 h以上。

4 总结和展望

本文基于神经网络构建了半接双星快速测光解轨的模型，其中包含主星充满和次星充满两个测光解轨模型。模型根据光变曲线和主星温度对半接双星的光变曲线进行建模，从而获得半接双星的轨道倾角、相对半径、质量比和温度比4个基本参数。结果表明，针对模拟数据，主星充满测光解轨模型对轨道倾角、相对半径、质量比和温度比的残差的标准差分别为0.238，0.003，0.010和0.024，拟合度可达0.99；次星充满测光解轨模型对轨道倾角、相对半径、质量比和温度比的残差的标准差分别为0.291，0.004，0.013和0.016，并且拟合度可达0.99。模型对Kepler的半接双星解轨的结果表明，对于对称的半接双星的光变曲线，该神经网络构建了半接双星快速测光解轨的模型对参数的估计较为准确，并且拟合度可达0.9以上。在相对误差为0.01时，模型对于轨道倾角接近90°、温度比约为0.6、光变振幅为1.84mag的半接双星的轨道倾角、相对半径、

质量比和温度比的测量误差分别为1.251，0.004，0.008和0.003。另外，模型能够较为准确地对脉动食双星的光变曲线进行建模，这对后续分析恒星脉动机制有着重要的意义，其次，该模型也为我们发现一些具有特殊机制的食双星提供了一个有效的工具。

采用该测光解轨模型大大减少了光变曲线建模需要耗费的时间，这对从海量光变曲线中获得半接双星的轨道参数解有重要的意义，这些参数的获得为研究密近双星系统的质量和角动量转移、损失和重新分布等提供了有利的数据基础。并且，基于光变曲线的建模也是研究食双星中的恒星脉动机制的基础，通过光变曲线建模消除双星掩食造成的光度变化对研究恒星的脉动机制有重要的意义，这为我们了解恒星内部提供了有利的工具。同时，本文提出的模型针对各个望远镜的测光数据均可进行迁移学习，例如，如果针对TESS的数据进行分析，只需将数据集换成TESS的观测波段的数据集进行训练。针对海量的光变曲线，该半接双星的光变曲线建模工具可以对大量的光变曲线进行快速建模，这对开展半接双星的性质统计分析以及快速搜寻半接双星中具有特殊机制的样本有重要意义。

参考文献:

[1] MINK S, LANGER N, IZZARD R G, et al. The rotation rates of massive stars:the role of binary interaction through tides, mass transfer, and mergers [J]. The Astrophysical Journal, 2013, 764(2):638.
[2] ELDRIDGE J J, STANWAY E R, XIAO L, et al. Binary population and spectral synthesis version 2.1: construction, observational verification, and new results[J]. Publications of the Astronomical Society of Australia, 2017, 34:e058.
[3] 陈雪飞，李焱，韩占文. 双致密星引力波源的形成[J]. 中国科学：物理学 力学 天文学, 2018, 48(7):26-56. CHEN X F, YAN L I, HAN Z W. The formation of double compact objects as gravitational wave sources[J]. Scientia Sinica：Physica Mechanica & Astronomica, 2018，48(7):26-56.
[4] LIAKOS A. Asteroseismology of Kepler Algol-type oscillating eclipsing binaries[J]. Astronomy & Astrophysics, 2017, 607: A85.
[5] AERTS C, HARMANEC P. Pulsating components in close binaries[C]//Proceedings of the ASP Conference Series. 2004:325-333.
[6] BORUCKI W J, KOCH D, BASRI G, et al. Kepler planet-detection mission: introduction and first results[J]. Science, 2010, 327(5968):977-980.
[7] Ricker G R, Latham D W, Vanderspek R K, et al. Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS)[C]//Proceedings of the American Astronomical Society Meeting. 2010.
[8] BELLM E C, KULKARNI S R, BARLOW T, et al. The Zwicky Transient Facility: system overview, performance, and first results[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2019, 131(995):018002.
[9] KOCHANEK C S, SHAPPEE B J, STANEK K Z, et al. The All-Sky Automated Survey for Supernovae (ASAS-SN) light curve server v1.0[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2017, 129(980):104502.
[10] KIRK B, CONROY K, PRŠA A, et al. Kepler eclipsing binary stars. VII. The catalog of eclipsing binaries found in the entire Kepler data set [J].The Astronomical Journal , 2016, 151(3): 68.
[11] CHEN X, WANG S, DENG L, et al. The Zwicky Transient Facility catalog of periodic variable stars[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2020, 249(1): 18.
[12] JAYASINGHE T, KOCHANEK C S, STANEK K Z, et al. The ASAS-SN catalogue of variable stars IX: the spectroscopic properties of galactic variable stars[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2021, 503(1): 200-235.
[13] DRAKE A J, GRAHAM M J, DJORGOVSKI S G, et al. The catalina surveys periodic variable star catalog[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2014, 213(1): 9.
[14] PRŠA A, ZWITTER T. A computational guide to physics of eclipsing binaries. I. Demonstrations

and perspectives[J]. The Astrophysical Journal, 2005, 628(1): 426.
[15] WILSON R E, DEVINNEY E J. Realization of accurate close-binary light curves: application to MR Cygni[J]. The Astrophysical Journal, 1971, 166: 605.
[16] 朱俐颖. 近相接型密近双星的观测研究[D]. 昆明：中国科学院云南天文台, 2004. ZHU L Y. Photometric and statistical study of near contact binaries [D]. Kunming: Yunnan Obervatories, Chinese Academy of Sciences，2004.
[17] EGGLETON P P. Approximations to the radii of Roche lobes[J]. The Astrophysical Journal, 1983, 268: 368–369.
[18] SLAWSON R W, PRŠA A, WELSH W F, et al. Kepler eclipsing binary stars. II. 2165 eclipsing binaries in the second data release[J]. The Astronomical Journal, 2011, 142(5): 160.
[19] LEE J W, PARK J H. KIC 6206751: the first R CMa-type eclipsing binary with γ Doradus pulsations[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2018, 480(4): 4693-4701.
[20] LEE J W. γ Doradus pulsations in the eclipsing binary star KIC 6048106[J]. The Astrophysical Journal, 2016, 833(2): 170.
[21] GILLILAND R L, CHAPLIN W J, DUNHAM E W, et al. Kepler mission stellar and instrument noise properties[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2011, 197(1): 6.

Light curve modeling of semidetached binaries based on Neural network

Xiong Jianping[1,2], Liu Chao[1,2*], Li Jiao[1,2], Li Chunqian[1,2], Zhao Yongheng[1,2]
（1. National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ）

Abstract: Semi-detached binaries are significant targets for the study of the formation and evolution of interacting binaries. Rapid modeling tool is highly required to derive the parameters with large amount of stars to be observed by many recent time-domain photometric surveys. In this work, based on a neural network, a light curve modeling of semi-detached binaries is proposed, which can derive orbital inclination(incl), relative radius(R/a), the mass ratio(q), and temperature ratio(T_2/T_1) fast via the observational light curve and known effective temperature of the primary star. The results of Kepler's light curve modeling show that the model can accurately fit the light curves of pulsating eclipsing binaries (the fitting degree can reach more than 0.9). For a target whose relative measurement error, orbital inclination, the amplitude of light curve, and temperature ratio are 0.01, ~90°, 1.84 mag, and 0.6, the measurement errors are 1.251, 0.004, 0.008 and 0.003 for incl, R/a, q, and T_2/T_1, respectively. In addition, as an application, the proposed model in this work can be deployed on other photometric data by simply replacing the train data, which provides an effective tool to obtain a large number of parameters of semi-detached binaries and fast search for candidates of abnormal binaries.

Key words: Stellar physics; Eclipsing binaries; Close binaries; Machine Learning; Data analysis;